



交通运输工程与信息学报

*Journal of Transportation Engineering and Information*

ISSN 1672-4747, CN 51-1652/U

## 《交通运输工程与信息学报》网络首发论文

题目： 面向多主体参与的多式联运竞合方法研究综述  
作者： 甘蜜，谭湘蓉，罗骁宇，张义萌，朱舒阳，丁万斌，刘晓波，马霖  
DOI： 10.19961/j.cnki.1672-4747.2026.01.015  
收稿日期： 2026-01-14  
网络首发日期： 2026-04-14  
引用格式： 甘蜜，谭湘蓉，罗骁宇，张义萌，朱舒阳，丁万斌，刘晓波，马霖. 面向多主体参与的多式联运竞合方法研究综述[J/OL]. 交通运输工程与信息学报. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2026.01.015>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 面向多主体参与的多式联运竞合方法研究综述

甘蜜<sup>1,2</sup>, 谭湘蓉<sup>1,2</sup>, 罗晓宇<sup>1,2</sup>, 张义萌<sup>\*1,2,3</sup>, 朱舒阳<sup>4</sup>, 丁万斌<sup>1,5</sup>,

刘晓波<sup>1,2</sup>, 马霖<sup>1</sup>

(1.西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 611756; 2.西南交通大学, 综合运输智能化四川省重点实验室, 成都 611756; 3.西南交通大学, 唐山研究院, 唐山 063000; 4.香港大学, 数据及系统工程学院, 香港, 999077; 5.中国国家铁路集团有限公司, 北京, 100891)

**摘要:**【背景】在全球供应链波动、“双碳”目标与多式联运“一单制”推进的背景下, 多式联运发展中多主体治理问题日益凸显。【目标】系统梳理多主体参与的多式联运竞合研究主题与方法体系, 并识别研究不足, 提出未来研究方向。【方法】融合文献计量与系统综述, 利用 CiteSpace 工具进行关键词可视化分析; 并按照战略层、战术层、运营层和应用层对相关研究进行归纳与比较。【数据】选取 CNKI 与 Web of Science 数据库中 2015-2025 年 6 月之间 116 篇相关的中英文文献。【结果】现有研究主要采用了博弈论、优化与仿真方法, 研究议题包括战略层的竞合博弈与政策激励下的均衡分析; 战术层的枢纽选址、网络资源配置与收益分配; 运营层的分布式协同调度与供需匹配; 以及应用层基于区块链/物联网的信任重构与平台设计。【结论】未来研究应聚焦于: 深化多政策情景下多式联运细分主体竞合行为分析; 构建异质货物协同网络与多周期动态收益分配机制; 发展隐私保护的实时调度与强化学习智能决策方法; 完善责任界定与法律适用规则, 加强技术落地的实证评估, 从而推动多式联运多主体治理从理论向实践转化。

**关键词:** 综合运输; 研究趋势; 文献计量分析; 多主体; 多式联运; 竞合方法

中图分类号: U2

文献标志码: A

DOI: 10.19961/j.cnki.1672-4747.2026.01.015

## Co-opetition in intermodal transport involving multiple stakeholders: A review

GAN Mi<sup>1,2</sup>, TAN Xiangrong<sup>1,2</sup>, LUO Xiaoyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yimeng<sup>\*1,2,3</sup>, ZHU Shuyang<sup>4</sup>, DING Wanbin<sup>1,5</sup>,  
LIU Xiaobo<sup>1,2</sup>, MA Lin<sup>1</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Intelligent Comprehensive Transportation Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Tangshan Institute, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China; 4. Department of Data and Systems Engineering, the University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 5. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing, 100891, China)

**Abstract:** [Background] Amid global supply chain volatility, the “dual-carbon” targets, and the promotion of the intermodal transport single waybill system, multi-stakeholder governance issues have become increasingly prominent in intermodal transport development. [Objective] To systematically review research themes and the methodological system on multi-stakeholder co-opetition in intermodal transport, identify research gaps, and propose future research directions. [Method] A

收稿日期: 2026-01-14

录用日期: 2026-04-08

审稿日期: 2026-01-14~2026-01-22; 2026-03-21~2026-04-03; 2026-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2568219); 四川省自然科学基金青年项目 (2025NSFSC1969); 中国铁路总公司科技研究开发计划 (N2025X022-B(JB)); 国家自然科学基金项目 (52402521; 52372306; 52472333; 52232011); 河北省自然科学基金项目 (G2024105007); 中央高校基本科研业务费项目 (No.2682025CX056)

作者简介: 甘蜜 (1984-), 女, 教授, 研究方向为综合交通运输、铁路货运及智慧物流, E-mail: migang@swjtu.edu.cn

通信作者: 张义萌 (1994-), 男, 副研究员, 研究方向为多式联运及多模式交通优化, Email: yimengzhang@swjtu.edu.cn

combined bibliometric and systematic review approach is adopted. CiteSpace is used for keyword visualization analysis, while existing studies are categorized and compared according to strategic, tactical, operational, and application levels. **[Data]** The database consists of 116 relevant Chinese and English articles from CNKI and Web of Science published between January 2015 and June 2025. **[Results]** Existing research has primarily employed game theory, optimization, and simulation methods. The research topics encompass: co-opetition games and equilibrium analysis under policy incentives at the strategic level; hub location, network resource allocation, and revenue distribution at the tactical level; distributed collaborative scheduling and supply-demand matching at the operational level; and trust reconstruction and platform design based on blockchain and IoT technologies at the application level. **[Conclusions]** Future research should focus on: analyzing the competition-cooperation behaviors of differentiated actors under multi-policy scenarios; constructing heterogeneous cargo collaborative networks and multi-period dynamic revenue allocation mechanisms; developing privacy-preserving real-time scheduling and reinforcement learning-based intelligent decision-making methods; and improving liability definition and legal applicability rules while strengthening empirical evaluation of technology implementation, thereby promoting the transformation of multi-stakeholders governance in intermodal transport from theory to practice.

**Key words:** integrated transport; research trend; bibliometric analysis; multiple stakeholders; intermodal transport; co-opetition methods

## 0 引言

集装箱多式联运是物流降本增效的关键路径,但我国不同区域和运输通道的发展水平差异较大,仍面临内陆渗透率不足、服务衔接不畅等问题<sup>[1]</sup>。除路径规划与运输组织等技术瓶颈外,多元主体之间的利益冲突、协同机制缺失与复杂竞合关系,正成为制约多式联运发展的重要因素<sup>[2-5]</sup>。

本文聚焦铁路、公路、水路(海运、内河航运)相结合的集装箱货物多式联运,不涉及航空联运、非集装箱货运及客运场景。多式联运系统涉及多式联运经营人、政府、承运人、场站运营商、货主等多元主体,各方职能与目标存在显著差异:多式联运经营人的核心目标是实现全程运输效率最优与自身利润最大化,政府关注宏观效率与公共利益,企业追求资产利用率与利润最大化,而货主聚焦时效与综合成本。在实际运行中,各方在网络构建、资源配置与定价等环节频繁互动,形成了既包含竞争又具备合作潜力的动态竞合关系。例如,港口间在腹地争夺和运价补贴方面竞争激烈,但在特定区域港口集团化或航运联盟背景下,也存在协同整合的可能<sup>[6]</sup>。“一单制”推行受阻,除了信任成本高与利益分配问题<sup>[7-9]</sup>,更深层的障碍在于责任界定不清、全程保险与理赔链条复杂以及法律适用不统一等问题。因此,本文所探讨的“面向多主体参与的多式联运竞合”,是指集装箱多式联运供应链中,不同主体围绕战略治理、资源协同配置、运营优化与应用支撑所形成的竞争-合作关系及其相关方法体系。

需要特别说明的是,集装箱多式联运的核心特征是货运单元在中途不进行拆装。因此,除特定引征外,本文多式联运英文术语统一采用“intermodal transport”,强调货运单元在中途不拆装的跨模式转运。而“multimodal transport”含义范围更广、涉及货物拆分重组的运输与客运中的多模式交通等。此外,对于强调实时调度与高度协同的同步多式联运情景(synchromodal transport),目前国内仍处于概念引入和探索性应用阶段,大规模成熟实践案例主要见于欧洲。

现有综述文献已对海铁联运<sup>[10]</sup>、同步多式联运<sup>[11-12]</sup>及特定优化问题<sup>[13]</sup>，或从文献计量角度梳理多式联运研究热点<sup>[14-15]</sup>，也有研究专门关注港口竞合<sup>[6]</sup>。然而，既有综述较少从“竞合”这一核心关切视角切入，对支撑多主体互动的方法归纳尚显薄弱。

多式联运多主体竞合问题具有显著的层次性特征，决策时间跨度、参与主体范围及问题性质随层级变化呈现规律性差异。基于此，本文构建“战略层-战术层-运营层-应用层”分层分析框架：战略层聚焦宏观治理与长期决策；战术层关注中期资源配置与利益分配问题；运营层面向短期动态调度，解决实时响应与分布式协同问题；应用层聚焦理论落地的技术原型验证和实际应用。四层框架从宏观到微观、从理论到实践，系统性地梳理多主体竞合研究的全貌。

本文采用文献计量分析与系统综述相结合的方法，对相关研究进行评述。主要贡献在于：（1）明确界定多主体竞合的内涵、范畴与方法体系；（2）构建融合竞合关系与多层次决策的系统性分析框架；（3）识别当前研究的薄弱环节，为多式联运竞合从理论模型向实践转化提供方向。

## 1 数据与方法

本文以 CNKI 和 Web of Science 为数据源，选取 2015 年 1 月 1 日至 2025 年 6 月 25 日发表的相关文献，文献类型包括 SCI、EI、北大核心、CSSCI、CSCD、AMI 及学位论文。考虑到相关研究在英文术语上存在一定混用，检索时保留 intermodal transport、multimodal transport 和 synchromodal transport 等表达，并在筛选阶段限定为符合本文研究范围的集装箱多式联运文献。经检索、去重和相关性筛选后，最终纳入中英文文献 116 篇。文献筛选流程如图 1 所示。

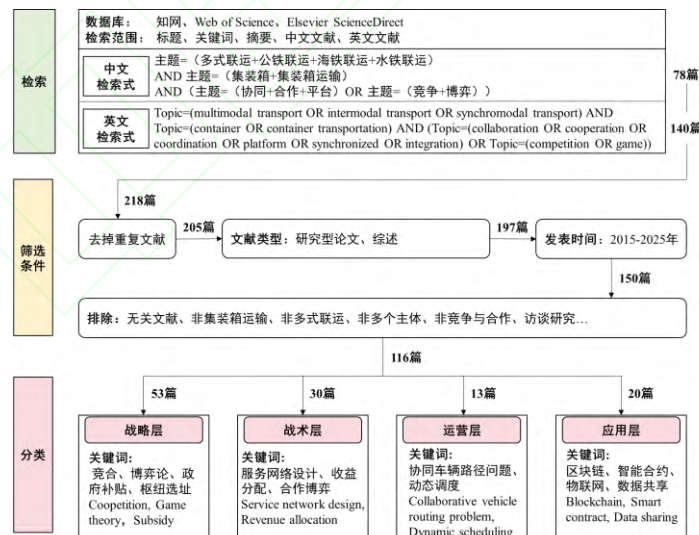


图 1 文献筛选流程

Fig.1 Literature screening process

## 2 文献计量分析

### 2.1 年度发文量及变化趋势

图 2 展示了 2015 年至 2025 年 6 月面向多主体参与的多式联运竞合研究的年度发文趋势。整体

而言，该领域研究总体呈波动上升趋势，2018 年与 2023 年形成两个显著高峰。中英文文献的增长轨迹差异明显，反映出国内外学术界在关注重点与驱动因素上的阶段性特征。

英文文献基数较大，发展脉络清晰，可分为两个阶段：（1）2015-2019 年为波动调整期，年发文量在 4-7 篇之间，研究聚焦基础理论探索。（2）2020 年起进入加速增长期，2023 年达峰值 16 篇。增长动因主要在于全球供应链韧性需求提升、区块链与物联网技术取得突破，以及全球碳减排的推动。

中文文献总量相对较低，演变过程呈现阶段性特征：（1）2015-2017 年为低位平稳期，年均发文 1-2 篇。（2）2018 年骤增至 9 篇，形成显著峰值，主要受政策驱动。2018 年《长江经济带多式联运发展三年行动计划》及《推进运输结构调整三年行动计划（2018-2020 年）》等文件出台，明确“公转铁”与多式联运顶层设计，学界迅速聚焦政府补贴界定、多主体协同路径等现实议题，催生了针对补贴机制、陆港建设等主题的研究，体现鲜明的政策驱动与问题导向特征。（3）2019-2025 年进入常态化阶段，年均发文稳定于 2-4 篇，研究逐步深化并转向应用实践。

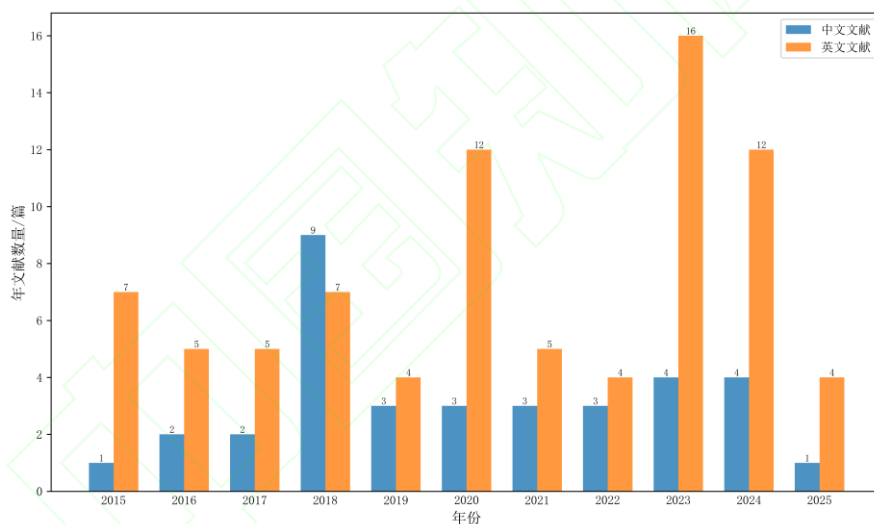


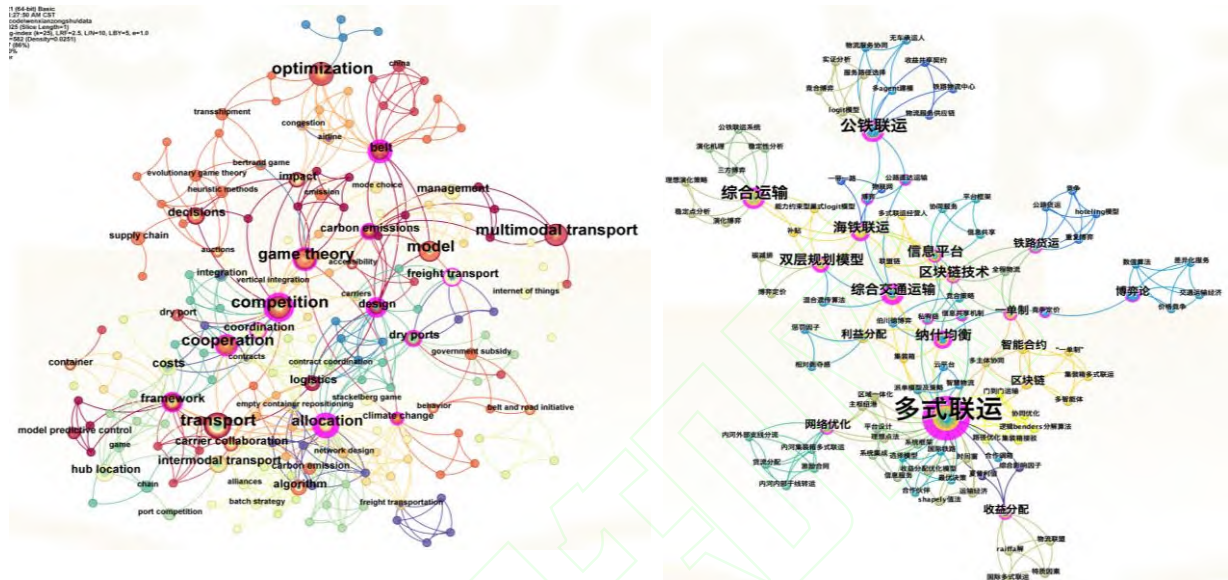
图 2 2015 年-2025 年面向多主体参与的多式联运竞合研究发文量趋势分析

Fig. 2 Trend analysis of publications on intermodal transport co-opetition research involving multiple stakeholders, 2015-2025

## 2.2 关键词共现分析

关键词是论文内容的高度概括和精炼，关键词共现频率的分析，能够在宏观上识别出多式联运竞合的研究主题情况。为直观展示近十年集装箱多式联运竞合方法领域的研究热点。使用 CiteSpace 软件分别绘制中英文文献的关键词共现图谱。英文图谱中共有 216 个节点，582 条连线，网络密度为 0.0251。节点越大，说明关键词出现的频率越高。出现次数最多的关键词是“cooperation”“competition”“multimodal transport”“game theory”“allocation”“optimization”等。根据关键词之间的连线的多少可以看出，多主体合作的研究集中于利润成本分配、多承运人协同及陆港方面；多主体竞争的研究

侧重采用博弈论及优化方法。中文文献图谱中共有 118 个节点，264 条线，密度为 0.0382。出现次数最多的关键词是“多式联运”“公铁联运”、“海铁联运”及“区块链技术”、“纳什均衡”、“双层规划模型”、“信息平台”等。中文文献呈现出较清晰的研究脉络。研究者围绕海铁、公铁等多元运输场景，采用博弈论方法，结合区块链、智能合约等技术工具，聚焦收益分配、网络优化、信息平台构建等问题进行研究。



(a) 英文关键词共现图 (b) 中文关键词共现图

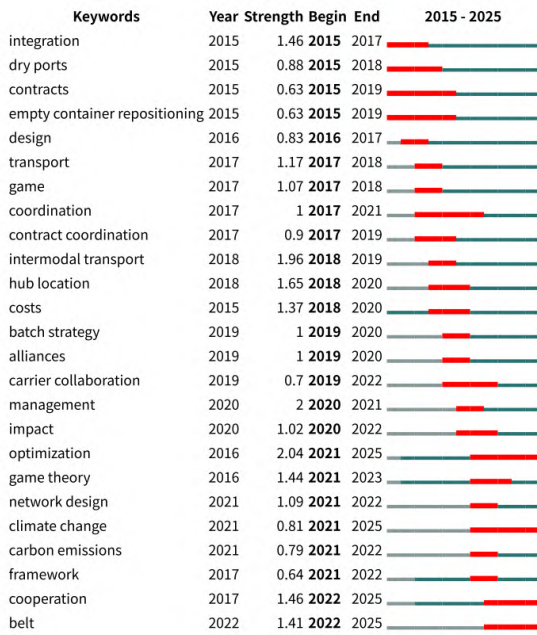
图 3 文献关键词共现图谱

Fig.3 Keyword co-occurrence map of literature

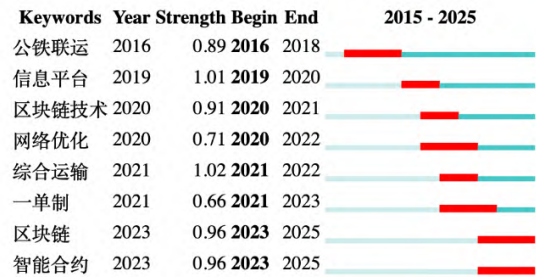
### 2.3 关键词突现分析

突现词主要是指某个时间段出现频率显著增加的关键词，能直观地展示该领域方法与热点的演化趋势。图 4 分别对中英文文献统计关键突显词。在英文文献中，可以从图中总结出三个主要发展阶段。2015-2017 年的研究主要集中在运输基础和理论框架上；2018-2020 年开始转向设施选址、成本问题、多承运人协同、联盟等关键词；2021-2025 年，优化算法和博弈论仍然是解决问题的核心工具，同时出现碳减排和气候变化等可持续性因素，应用场景更复杂，体现了一定的政策驱动。

中文文献的研究相对较少，因此只展示出现频率较高的前 8 位关键词，2016-2018 年聚焦“公铁联运”模式下的竞合分析；2019-2022 年“信息平台”“区块链技术”“网络优化”突现，体现了信息技术和资源网络优化的多维度竞合方法；2023-2025 年“区块链”、“智能合约”突显，结合《关于加快推进多式联运“一单制”“一箱制”发展的意见》等国家政策的号召，反映出竞合研究从理论分析角度向技术驱动和实践应用发展。



(a) 英文关键词突现图



(b) 中文关键词突现图

图 4 文献关键词突现图

Fig. 4 Keyword burst map of literature

## 2.4 关键词时序分析

基于时间维度对关键词展开时序分析，构建并生成近十年关键词时间线图谱见图 5、图 6。借助该图谱可深入解析不同研究阶段关键词的活跃特征、关联强度及演变路径，进而清晰展现出各时期研究者的核心关注方向。

英文图谱识别出 11 个主要研究聚类，大致可以分为 3 个演变阶段。2015-2017 年以博弈论为理论基础，关运输整合与协同障碍分析，其中活跃的聚类包括“#6 barrier to ICT adoption”和“#3 Port competition”“#1 Tactical planning”。2018-2020 年深化至以协调机制和物联网应用为核心、探讨网络结构、承运人协同和契约协同等方面，活跃的聚类包括“#2 Contract coordination”和“#8 Double auction mechanism”。2021-2025 年的研究将环境因素纳入决策，聚类“#4 Carbon emissions”高度活跃，涵盖 carbon tax、climate change 等关键词。聚类“#5 augmented lagrangian relaxation approach”中 online learning、coordinated mechanism 的出现，表明研究在解决大规模、复杂的网络设计和优化问题时，开始采用更复杂的优化方法。

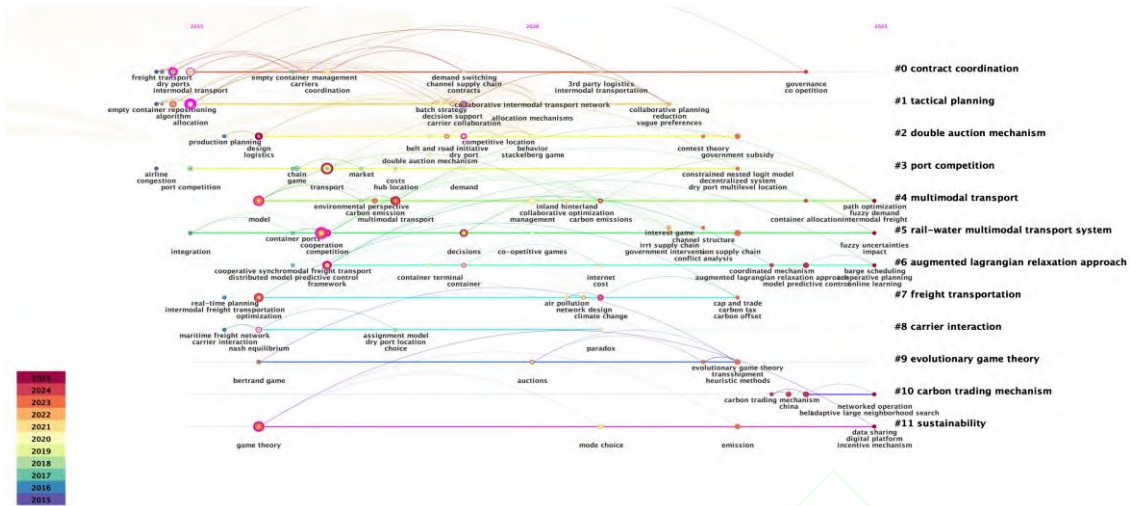


图5 英文文献关键词时间线图谱

Fig.5 Keyword timeline visualization of English literature

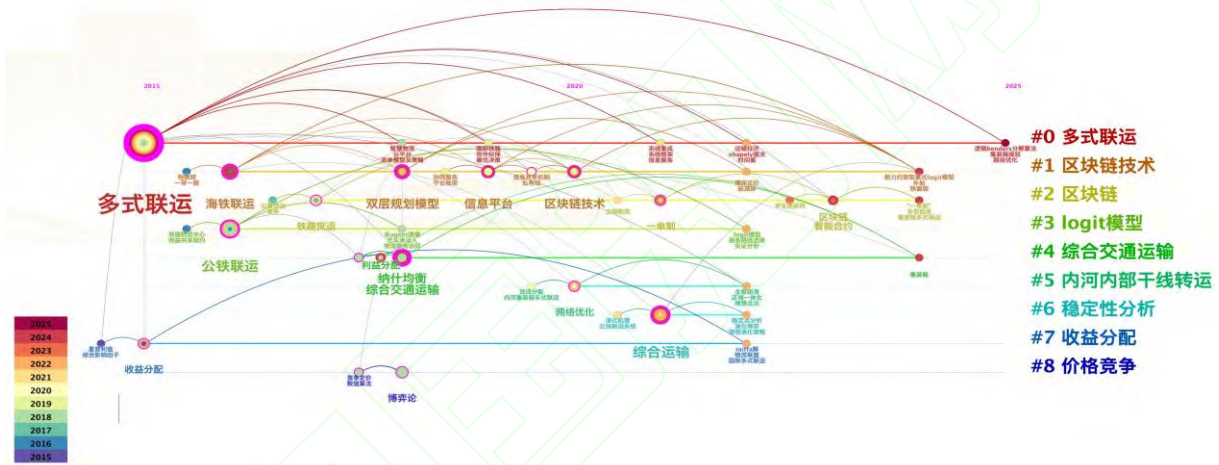


图6 中文文献关键词时间线图谱

Fig.6 Keyword timeline visualization of Chinese literature

中文文献主要呈现出三个阶段。2015-2017年，“多式联运”“公铁联运”“海铁联运”是这一阶段的标志性关键词，2018-2020年，“双层规划模型”“纳什均衡”“利益分配”“博弈论”等方法类关键词出现，相关研究通过运筹学模型解决联运网络优化问题，采用博弈论进行多主体利益分配。2021-2025年，“区块链智能合约”“logit模型”等关键词成为热点。

### 3 战略层：多式联运竞合博弈与治理

多式联运战略层从宏观治理与长期决策视角出发，将战略层研究划分为竞合博弈问题、政策干预与外部环境、合作伙伴评价与资源布局、竞合失败风险四个维度。战略层问题的本质是协调政府、港口、承运人等多元利益主体在基础能力资源约束与目标冲突下实现长期的战略均衡。首先，竞合博弈分析奠定多式联运竞合的理论基础；其次，政府政策是引导系统由个体理性向整体最优发展的关键外生变量；再次，伙伴评价与资源布局将竞合关系落实到物理节点与组织载体；最后，从逆向

视角剖析竞合失效诱因，揭示形成竞合关系的现实要求。

### 3.1 竞合博弈问题

多式联运竞合博弈主要涉及的问题有港口间竞合博弈、政府主导下的港口多式联运三方博弈、公路直运与多式联运系统的竞争、公铁/海铁/铁水定价博弈与服务竞争，以及港口与内陆服务整合问题。陈宁等<sup>[16]</sup>利用伯川德博弈比较了港口间竞争与合作情景下的利润变化；Song 等<sup>[17]</sup>同时考虑了海运供应链的横向和纵向的竞合博弈，采用两阶段非合作博弈方法对两个航运公司和两个港口之间的互动进行建模。随着研究深入，演化博弈逐渐成为分析竞合策略变化的关键工具。Liu 等<sup>[18]</sup>通过有限和无限时域下的重复定价博弈，分析了合作竞争的复杂性和演化过程。徐新扬等<sup>[19]</sup>构建三方演化博弈模型，发现政府支持是促使系统收敛至合作均衡的重要因素。此外，学者多采用 Stackelberg 博弈方法刻画多式联运中存在的主导者-追随者关系。Tamannaei 等<sup>[20]</sup>采用 Stackelberg 博弈研究了政府干预下多式联运经营人与公路直运经营人的竞争价格问题，指出领导者若采取障碍定价策略对竞争双方都不利。价格策略是联盟稳定性调节的关键因素<sup>[21-23]</sup>。片锋等<sup>[24]</sup>采用 Stackelberg 博弈，从铁路价格折扣角度证明了合理的价格激励可同时提升系统利润。

关于港口间竞争环境下港口与内陆的整合问题，Song 等<sup>[25]</sup>建立了双层供应链博弈模型，指出竞争性的上游航运公司通过整合下游铁路服务来提供多式联运，能够实现系统层面的帕累托改进。而 Álvarez-Sanjaime 等<sup>[26]</sup>应用 Hotelling 空间博弈模型和伯川德博弈方法，强调港口向内陆运输服务整合虽然对港口有利，但会带来总福利下降和用户剩余的减少。但当港口容量、政府补贴额度以及整合效率的增益不同时，可以抵消负面影响，对于规模越大的港口整合越有利。Munim 等<sup>[27]</sup>针对跨国多式联运场景，建立了港口与港口用户之间的多目标线性规划模型，以决策内陆国家如何选择最优的转运港口，研究表明，港口用户的内陆运输成本决定了其转运的需求以及与港口合作的选择。以上研究表明，港口基础能力约束以及港口用户的运输成本是港口与内陆服务合作的基础条件。

本文针对竞合博弈问题的参与主体、竞合类型、博弈方法、研究内容进行了整理，见表 1，可知多式联运竞合博弈研究具有以下特点：多数文献集中于港口多式联运场景，参与主体包括政府、港口、内陆运输服务运营商（铁路与公路）、海运承运人、托运人，多数文献考虑纵向竞合类型，以参与者各自利润最大化为目标，采用博弈模型刻画竞合关系及其演化过程，从而分析影响竞合的关键因素以及竞合策略带来的经济效益与激励。

表 1 竞合博弈问题研究总结

Tab.1 Summary of research on the evolution of co-opetition game theory

作者	参与主体	研究问题	目标	竞合类型	博弈模型	核心内容/结论
陈宁 <sup>[16]</sup>	港口间	竞合博弈	港口收益最大化	横向竞合	伯川德博弈	比较了竞争与合作情景下的利润变化。

Liu <sup>[18]</sup>	下游承运人（服务互补）	运输服务竞合	最大化联合/各自的利润	纵向竞合	两阶段动态博弈	证明了投资合作与定价竞争模式能有效提升系统效率。
徐新扬 <sup>[19]</sup>	政府、公路企业、铁路企业	公铁联运系统三方博弈	收敛于演化稳定策略	纵向竞合	演化博弈	强调政策参数对公铁联运系统动态演进策略的稳定性影响。
李路辉等 <sup>[23]</sup>	铁路、公路承运人	公铁博弈下铁路定价	最大化各自收益	纵向竞合	博弈论、非线性 Gauss-Seidel 算法	为铁路合理确定集装箱价格浮动范围提供参考。
片锋等 <sup>[24]</sup>	托运人、承运人	公路与多式联运博弈定价	承运人利润最大、托运人费用最小	横向竞争	Stackelberg 博弈、铁路折扣机制	铁路折扣可调节公路与联运的分担比重。
Song <sup>[25]</sup>	上游海运公司、下游铁路公司	激励多式联运供应链的博弈理论分析	最大化自身利润	纵向竞合	两层供应链博弈模型、纳什博弈	竞争性承运人通过铁路资源整合可实现供应链层面的帕累托改进。
Álvarez-Sanjaime <sup>[26]</sup>	港口、公路企业	港口与内陆服务整合	各港口收益最大化	横向竞争下的纵向整合	Hotelling 空间博弈模型，伯川德竞争	揭示了港口向内陆运输纵向整合的经济激励与市场影响。
Munim 等 <sup>[27]</sup>	港口、内陆客户	转运港口选择竞合	最小化用户成本、最大化港口转运收入	纵向竞合	混合整数线性规划优化模型，最近邻算法	内陆运输成本是决定需求的关键因素；实证评估区域合作的经济潜力。
张桐等 <sup>[28]</sup>	托运人、公路承运人、物流企业	公路联运定价博弈	最大化各自收益	纵向竞合	Nash 均衡定价博弈	揭示了价格竞合如何改变托运人偏好。

### 3.2 政策干预与外部环境

政府政策对多式联运系统的发展具有关键的影响。早期研究多采用双层规划和博弈模型分析补贴策略。吴云强等<sup>[29]</sup>发现，政府间协同补贴相较分散决策能够在降低财政负担的同时显著提升海铁联运份额。进一步地，学者开始对比不同类型激励工具的有效性。Qu 等<sup>[30]</sup>基于博弈定价模型，对比了走廊投资、直接补贴及组合策略对内陆港整合的影响，指出港口当局的策略选择取决于改善运输便利性的单位投资成本与托运人偏好。Xu 等<sup>[31]</sup>则在铁水联运场景下进一步辨析了价格补贴政策与建设无水港政策的差异，发现虽然价格补贴能快速提升铁路运量，但无水港建设通过压缩运输时间成本，对长期竞争格局产生更深远的影响。

随着低碳目标的提出，研究进一步比较了补贴与市场化环境政策工具。Chen 等<sup>[32]</sup>将承运人定价

博弈嵌入补贴决策中，以最大化单位补贴减排效率。Xu 等<sup>[33]</sup>建立了一个考虑环境因素的港口竞争博弈模型。Long 等<sup>[34]</sup>和 Shams 等<sup>[35]</sup>基于欧洲等特定制度环境的博弈论模型分析指出，碳交易机制在协调社会福利与企业利润方面往往优于单一补贴。然而，目前我国碳市场在交通领域的覆盖尚不完善，补贴仍是引导多式联运发展最直接、最主要的政策工具。Zhang 等<sup>[36]</sup>量化分析了多式联运竞争对碳排放和社会福利的影响，提出若中欧班列减排强度不足 90%，多式联运竞争反而可能导致总排放量上升。Gong 等<sup>[37]</sup>将政策视野从单一的资金补贴拓展到空间维度的环境规制。并建议政府应根据市场竞争结构动态调整政策组合，利用竞争机制将环境外部成本转化为企业服务质量提升的动力，而非盲目推动承运人之间的横向整合。近年来，频发的供应链中断事件促使学界关注系统的韧性目标。Shi 等<sup>[38]</sup>将运输中断风险纳入博弈框架，指出港口与内陆运输商的协同有助于提升供应链韧性；Wu 等<sup>[39]</sup>和 Yang 等<sup>[40]</sup>则分别从灾害不确定性与基础设施拥堵角度，探讨政府补贴与主体竞合行为之间的互动关系。

本文针对多式联运竞合中政府干预与外部环境问题的参与主体、政策工具等内容进行了整理，如表 2，可知现有研究多数以政府为主导，采用不同情景的模型进行分析，将激励政策与服务定价相联系，探究了协同补贴、价格补贴、无水港建设、碳交易、碳管制等政策的效果，并从单一经济目标向多目标发展，形成了涵盖经济效率、环境可持续性 & 系统韧性的多目标评估体系。

表 2 政策干预与外部环境研究总结

Tab.2 Summary of research on policy interventions and external environment

作者	参与主体	政策工具	建模方法	非经济目标	核心内容
吴云强 <sup>[29]</sup>	政府、托 运人	协同补贴 政策	双层规划模型	降低财政负担	协同补贴较分散决策能更显著提升海铁联运的市场份额。
Qu <sup>[30]</sup>	港口、托 运人	走廊投 资、直接 补贴、组 合策略	Stackelberg 博 弈	内陆整合效率、 港口竞争力	策略选择取决于投资带来的便利性收益与托运人对时间的敏感度。
Xu <sup>[31]</sup>	政府、承 运人、托 运人	价格补 贴、无水 港建设	三阶段博弈模 型	运输结构优化、 低碳转型	价格补贴能快速提升铁路运量，而无水港建设利于社会的长期发展。
唐继孟 <sup>[41]</sup>	政府、铁 路公司、 托运人	补贴政策	双层规划、随 机用户均衡	运输竞争力	揭示了补贴额度与托运人模式选择之间的非线性响应关系。
Long <sup>[34]</sup>	政府、运 输企业	碳交易机 制	博弈论，模糊 不确定性	环境可持续性	碳交易机制在协调社会福利与利润方面往往优于单一补贴工具。
Shams <sup>[35]</sup>	政府、公 路系统、	碳管制政 策	Stackelberg 博 弈、Nash 博	碳配额约束	确定了在双头垄断货运市场中政府最有效的减

	公铁系统		弈		排监管策略。
Zhang <sup>[36]</sup>	中欧班列、海运企业、政府	运价补贴	Hotelling 博弈	碳排放、社会福利最大化	若中欧班列减排效率不足，单一的补贴可能导致碳排放升高。
Shi <sup>[38]</sup>	海运、内陆运输承运人	协同应急机制	博弈论模型（集中/分散/混合场景）	中断风险/韧性	港口与内陆运输商的纵向协同能有效提升海运供应链自愈能力。
Wu <sup>[39]</sup>	海港、陆港、政府	灾害适应政策	博弈论模型	灾害不确定性	探讨陆港竞合关系对海港应对灾害不确定性策略的影响。

### 3.3 合作伙伴评价与战略资源布局

多式联运联盟的形成依赖于对潜在伙伴能力的精准评估。现有研究多构建综合评价指标体系，利用灰色关联度、熵权法及层次分析法对承运人或物流企业进行多维度筛选，说明联盟规模与收益分配规则是影响合作伙伴选择及其稳定性的关键因素<sup>[42-43]</sup>。

枢纽选址与网络结构具有显著的长期效应，是竞合博弈在物理层面的呈现。因此，近年来的研究不仅仅考虑成本最小化，且将竞合关系嵌入网络优化模型中。Jiang 等<sup>[44]</sup>利用 Stackelberg 博弈分析竞争港口的选址策略差异，并将港口容量约束纳入博弈模型，为竞争港口在重叠的内陆区域发展多式联运网络提供了研究框架。Chen 等<sup>[45]</sup>在西非港口群研究中引入了“安全走廊”概念，构建了带均衡约束的非线性规划模型，在考虑内陆运输安全风险与托运人路径选择行为的基础上，实现了港口容量扩张、投资选址与安全走廊建设的协同优化。部分研究采用多目标规划或博弈-优化混合模型，刻画了政府、港口经营人与承运人等在网络设计中的利益冲突与协同潜能<sup>[46-48]</sup>。同时，相关研究表明战略层的资源布局决策，本质上是在多维能力约束边界内寻求最优解的过程<sup>[47]</sup>。表 3 对相关研究的参与主体、决策问题、方法和主要内容进行了总结

表 3 合作伙伴评价与资源战略布局研究总结

Tab.3 Summary of research on partner evaluation and resource strategic deployment

作者	参与主体	决策问题	方法	主要内容
李华强 <sup>[43]</sup>	多式联运经营人、承运人	合作伙伴筛选	熵权法、灰色关联分析、层次分析法	构建了基于能力与可靠性的承运人多维度筛选准则
Jiang <sup>[44]</sup>	托运人、港口经营人	枢纽选址	Stackelberg 博弈	分析了竞争港口在重叠内陆腹地的选址博弈与网络演变
Chen <sup>[45]</sup>	港口群、内陆城市	港口合作选址、安全走廊建	带均衡约束的非线性规划	在考虑内陆运输风险与托运人路径选择行为的基础上，实现港口容量与选址

		设		的优化
Li <sup>[46]</sup>	地方政府、中央政府、承运人	枢纽选址	双层规划模型	考虑政策引导下的“一带一路”多式联运枢纽布局优化
Tsao <sup>[47]</sup>	托运人、陆港、海港	网络设计	混合整数规划	考虑碳排放约束下的海港-陆港网络竞合与结构优化
Zhang <sup>[49]</sup>	港口间	港口竞争选址与定价	Nash 均衡-优化混合模型	刻画了枢纽节点在重叠腹地竞争中的定价与布局博弈

### 3.4 竞合失败与协同障碍

多式联运多主体竞合关系虽在理论上能实现协同均衡，但在现实中常因为各类约束而出现偏离甚至破裂。针对竞合失败的内在机理、协同的现实障碍，战略层的研究多有涉及。

不同竞合类型中失败的原因不同。纵向竞合主要发生在政府与企业、托运人与承运人、港口与上下游服务商的层级博弈中，主要源于委托代理矛盾、利益目标不兼容、承诺不可信等问题。张慧等<sup>[50]</sup>研究发现，当企业公转铁的净收益未达阈值时，即便有政策引导，也会出现纵向协同失效。此外，针对托运人与承运人的纵向博弈，段华薇等<sup>[51]</sup>指出，当运输服务的契约设计不完善、风险与收益不匹配时，会引发双边道德风险，导致合作关系破裂。

横向竞合失败主要发生在港口间、承运商间等同层级主体的竞合博弈中，核心源于无序竞争、搭便车效应、收益分配不公等原因。张得志等<sup>[52]</sup>针对内河港与无水港的研究发现，两者的无序竞争会导致资源浪费、利润下降；李丹丹等<sup>[53]</sup>通过铁水联运企业的演化博弈模型证实，当合作的额外成本高于违约金、额外收益分配不公时，会对合作产生不利影响。更具代表性的是，Liu 等<sup>[54]</sup>指出了横向竞合中的搭便车效应，即多式联运运营商的服务努力会提升整体市场需求，但铁路公司、班轮公司会无偿享受需求红利，进而削弱运营商的服务投入意愿，导致整个铁水联运系统的竞合关系失衡、协同效率下降。

制度政策与跨主体治理障碍是跨区域、跨运输方式协同的核心障碍。研究指出，我国铁路、公路、水路、港口分属不同管理体系，制度标准不统一、跨区域政策不协调、监管规则不一致，导致多主体协同的制度性交易成本极高<sup>[55,56]</sup>。经济利益分配会很大程度上影响协同关系。Ramaeckers 等<sup>[57]</sup>针对多式联运货运捆绑的协同研究发现，成本节约的分配公平性直接决定了合作联盟的稳定性。贺政纲等<sup>[58]</sup>、朱文英等<sup>[59]</sup>研究也一致证实，若收益分配未充分匹配参与主体的贡献度、风险承担和资源投入，会显著降低合作意愿。此外，Khaslavskaya 等<sup>[60]</sup>指出托运人在与竞争对手横向合作时面临内部管理障碍。同时，宏观政策的摇摆或激励不足也会削弱微观主体的协作意愿。例如，欧盟旨在

促进“公转铁”的《组合运输指令》修订案一度被搁置，引发了市场对政策持续性的疑虑<sup>[61]</sup>。

### 3.5 研究方向

通过3.1-3.4节的文献梳理可见，战略层包含了丰富的研究主题，竞合博弈问题涵盖港口间竞争、公铁/海铁定价博弈与服务竞争、港口与内陆服务整合等；政策方面包括协同补贴政策、碳交易与碳管制政策以及供应链中断风险下的韧性政策等；合作伙伴评价与战略资源布局涉及合作伙伴多维评价、枢纽选址博弈、网络协同设计与布局优化等，并已形成以博弈论为主、评价与优化集成的方法体系。

但结合研究现状与行业需求来看，现有研究仍存在一些不足，具体可从以下方向深化。

(1) 主体类型覆盖不足。现有文献多聚焦政府<sup>[28,32,50]</sup>、港口<sup>[47,48,62]</sup>、干线承运人<sup>[17,19,26]</sup>、大型多式联运经营人<sup>[21,35,43]</sup>这几类主体的横纵向竞合关系。未来可以深化细分主体的竞合行为与协同机制研究。将多式联运中广泛存在的中小货主、区域物流平台、无车承运人、内陆支线承运人等细分主体纳入竞合分析框架，刻画其决策逻辑、风险偏好与策略选择特征，分析细分主体与核心主体之间的纵横向竞合互动关系。

(2) 竞合博弈对于现实运营过程中的硬性能力资源约束考虑不足。现有博弈模型多以价格<sup>[24,51,63]</sup>、收益<sup>[41,63,64]</sup>、成本<sup>[27,65]</sup>为核心决策变量或优化目标。未来研究可嵌入运营硬性约束条件，构建更贴合实际的竞合博弈模型。将铁路班列时刻、堆场容量、干线运能等运营硬约束，作为内生变量纳入多主体博弈模型，分析硬约束边界对主体策略选择、博弈均衡结果的影响。

(3) 多主体竞合失败机理研究不深，动态演化与韧性分析存在不足。现有竞合失败研究多聚焦双主体<sup>[53]</sup>、三方博弈<sup>[19,50]</sup>的静态均衡稳定条件。未来可以深化多主体网络竞合失效的传导机理研究，促进竞合关系韧性提升。研究多式联运竞合失效的动态演化路径、跨主体连锁传导机制，明确失效扩散的关键节点与临界条件。同时，结合供应链中断、灾害风险等场景，分析多主体竞合关系的韧性边界，探索竞合失败的协同修复措施。

(4) 政策工具的组合效应与场景区域适配性研究不足。现有政策研究多集中于单一政策工具的效果评估<sup>[29,34,35,41]</sup>。未来研究可以构建跨区域的多目标政策设计框架。例如，在“低碳-韧性-效率”耦合目标下，以西部陆海新通道（重庆-北部湾港）集装箱海铁联运通道为案例，设计碳配额与补贴组合的量化模型。分析政府如何在最大化社会福利与引导企业节能减排之间找到动态平衡点。同时，补贴政策需要结合港口的区位条件、运输通道现实情况与承运人偏好，因地制宜。并协调沿线各省级政府的补贴程度和差异。

(5) 资源布局与竞合策略的联动研究及双向互动的长期演化规律刻画不足。例如，枢纽选址博弈研究<sup>[44,46,47]</sup>多聚焦静态场景下的布局均衡。未来可以构建多周期、动态化的分析框架，揭示枢纽选

址、网络布局等资源决策与多主体竞合均衡之间的双向互动机制。

#### 4 战术层：多式联运网络资源竞合优化

战术层是战略层竞合关系在资源层面的延伸和细化，考虑铁路班列时刻、空箱存量等资源约束条件，聚焦于既定网络结构下多主体间的资源协同配置问题。相关研究可划分为服务网络与运力资源协同配置、收益分配与联盟稳定机制两个维度。具体而言，服务网络与运力资源协同配置，侧重于解决资源整合与组织协同问题；收益分配与联盟稳定机制，侧重于通过公平合理的分配规则确保联盟在资源共享过程中的稳定性，两者相辅相成，共同构成战术层协同的核心内容。

##### 4.1 多式联运服务网络与运力资源协同配置

服务网络与运力资源配置是战术层网络资源竞合优化的基础问题，主要关注联运通道组织、服务频次与时刻表、运力规模以及模式组合等要素的协同配置，也包括空箱等资源在网络内的配置与调度。在多主体参与情境下，此类问题往往需要在系统效率最优与各主体收益之间取得平衡，相关研究逐步向多主体协作下的网络结构优化与资源配置发展。

在协同网络设计与运力规模配置方面，Liu 等<sup>[66]</sup>在协作联运网络设计中引入规模经济，刻画货运通道规模与车队规模选择，以降低系统总运输成本。此外，Liu 等<sup>[67]</sup>针对油气钻井设备运输，将运输服务选择、车辆安排与交付时间限制纳入协作网络设计模型，考虑了业务场景中运输资源配置的约束。在港口与腹地系统的服务组织与协同方面，Hu 等<sup>[68]</sup>将港口枢纽间转运与腹地铁路运输一体化建模，通过整数规划与滚动时域决策，降低了延误率。Li 等<sup>[69]</sup>采用分布式模型预测控制框架，在需求不确定条件下实现同步多式联运下多运营商的滚动规划与分布式协调。

在刻画主体策略行为方面，研究引入博弈与拍卖机制解决竞合问题。Bukvić 等<sup>[70]</sup>运用博弈论分析联运网络路线选择，讨论囚徒困境以及 Braess 悖论对路径决策的影响。Tang 等<sup>[71]</sup>针对国际贸易运输策略的选择，构建了 Stackelberg 博弈，并以成本、时间与运输安全等指标评价运输方案。Sun 等<sup>[72]</sup>面向联运服务采购，在考虑交易成本的基础上提出 3 种双拍卖机制，并以社会福利最大化为目标进行供需匹配与定价。

除通道与运力外，空箱协同亦是战术层配置的重要内容。Xie 等<sup>[73]</sup>在海港与陆港协同情境下，将空箱供需随机性纳入决策，对比集中式与分散式空箱库存管理，并通过双边回购合同实现系统协调。Luo 等<sup>[74]</sup>进一步考虑港口与陆港之间的空箱需求转换，比较集中与分散决策并讨论契约协同。表 4 对相关文献进行了整理。

表 4 多式联运服务网络与资源协同配置研究总结

Tab.4 Summary of research on intermodal transport service networks and resource coordination

研究主题	作者	运输场景	参与主体	聚合类型	模型方法/求解
通道规模与车队	Liu 等 <sup>[66]</sup>	公-铁联运网络	货运代理	横向协作	最小成本模型；混合

规模协同选择					GA-PSO; 批处理策略
协作网络设计	Liotta 等 <sup>[75]</sup>	公-铁-海联运网络	多承运人	横向协作	混合整数线性规划、仿真
	Liu 等 <sup>[67]</sup>	公-铁油气钻井设备运输	供应商/钻探站点/枢纽/货运代理/承运人	横纵向协同	混合整数规划; 混合遗传算法和粒子群优化
港口枢纽-腹地铁路一体化	Hu 等 <sup>[68]</sup>	港口-腹地系统	港口经营相关主体	纵向协同	整数规划模型; 滚动时段
同步多式联运协同规划	Li 等 <sup>[69]</sup>	公-铁-水同步联运网络	多承运人	横向协作	分布式模型预测控制; 拉格朗日松弛
路线选择与拥堵影响分析	Bukvić 等 <sup>[70]</sup>	公-铁联运网络	承运人、物流运营商	横向	博弈论、囚徒困境、Nash 均衡
国际贸易运输策略选择	Tang 等 <sup>[71]</sup>	国际贸易运输	发货人、承运人	纵向	Stackelberg 博弈
服务采购与交易机制设计	Sun 等 <sup>[72]</sup>	海-公等联运服务采购	货主、承运人、拍卖人	纵向协同	多种双拍卖机制
空箱库存共享与契约协调	Xie 等 <sup>[73]</sup>	海港-陆港	班轮公司、铁路;	纵向协同	集中/分散对比; Nash 均衡; 双边回购合同
需求转换下空箱调运与库存协调	Luo 等 <sup>[74]</sup>	海港-陆港	班轮公司、铁路公司	横向协同	集中/分散对比; 契约协同理论

#### 4.2 多主体协作下的收益分配与联盟稳定机制

多式联运协同网络中, 收益/成本分配问题往往直接影响联盟的稳定运行, 是战术层协同可持续发展的关键内容。相关研究主要以合作博弈理论为基础, 围绕定价与收益分配方法的公平性、稳定性与现实适用性展开。

在方法体系上, 早期研究讨论了经典分配规则的适用性。Ramaekers 等<sup>[57]</sup>以多式联运驳船网络货量捆绑为例, 比较比例分配、路径分解、Shapley 值和等利润法等不同成本分摊方式, 揭示分配规则对联盟稳定性的影响差异。Guo 等<sup>[76]</sup>在铁水联运网络协作背景下, 基于合作博弈提出贡献导向的收益分配思路。李倩等<sup>[77]</sup>在对比不同联盟结构的基础上, 结合 Raiffa 解优化开展收益分配研究, 反映出分配方案与联盟组织形态之间的耦合关系。

为提升现实适配性, 研究开始将联盟动态演化、资源投入与风险差异引入分配模型。贺政纲等<sup>[58]</sup>考虑成员中途加入/退出情形, 引入蚁群劳动分工机制实现收益再分配。张德超<sup>[78]</sup>基于纳什均衡视角, 将资源投入、风险承担等因素纳入分配框架。朱文英等<sup>[59]</sup>则在时间窗约束下引入时间奖励等因素。针对信息不对称与风险偏好差异, 张文瀛<sup>[79]</sup>通过 Stackelberg 博弈双层规划刻画多式联运经营人

与承运人之间的激励契约与分配决策。表 5 对相关研究进行了梳理。

表 5 收益分配与联盟稳定机制研究总结

Tab.5 Summary of research on revenue distribution and alliance stability mechanisms

分配问题	作者	联盟场景	分配方法	关键考虑因素
成本分摊 (货量捆绑)	Ramaekers <sup>[57]</sup>	多托运人	比例分配、路径分解、Shapley 值	以相对节约差异等指标衡量公平性；比较联盟稳定性
收益分配优化	Guo <sup>[76]</sup>	多承运人	合作博弈；贡献分配；Shapley 值	联盟总利润最大化前提下按贡献分配
	李倩 <sup>[77]</sup>	三方独立经营/ 两两结盟/三方联盟等结构对比	变异系数法；层次分析法；Raiffa 解优化	兼顾公平与收益；考虑联盟结构差异
	陈芊 <sup>[80]</sup>	制造商/货运公司/港口等纵向协作	纳什均衡；层次分析法	引入综合修正因子，最大化联盟剩余利润乘积
	张德超 <sup>[78]</sup>	多式联运经营人、承运人	修正 Shapley 值；Nash 谈判（合作博弈）	考虑风险等综合修正系数
动态收益再分配	贺政纲 <sup>[58]</sup>	多式联运企业联盟	蚁群劳动分工机制	动态情景下兼顾公平性与理想利益实现程度
时间窗约束下收益分配	朱文英 <sup>[59]</sup>	多式联运企业协作	Shapley 值；AHP	考虑贡献、风险、不稳定因素与时间奖励；引入时间窗约束
信息不对称/风险偏好下分配与契约	张文瀛 <sup>[79]</sup>	多式联运经营人/承运人/货主协作	Stackelberg 双层规划；效用函数；智能算法	需求/成本/时间不确定；风险偏好差异

#### 4.3 研究方向

战术层已在服务网络设计与收益分配等研究主题上取得一定进展，服务网络设计具体包括通道与车队规模协同选择、协作网络设计、港口枢纽-腹地铁路一体化、空箱库存共享等内容；收益分配问题涵盖成本分摊规则、贡献导向的收益分配、动态收益再分配以及时间窗约束下的收益分配等内容，已形成网络优化与合作博弈相结合的方法体系。

但仍存在不足之处，例如，现有网络优化研究多假设单一类型的普通货物<sup>[58,67,69]</sup>，缺乏对危化品、冷链货物等特殊货类的考虑。收益分配研究多基于静态合作博弈视角<sup>[71,76,81]</sup>，未能刻画联盟成员在多周期合作中的演化。此外，研究多基于静态网络或单期假设<sup>[66,82-84]</sup>，难以适应多式联运中短期运营的需求波动与运力供给变化。结合多式联运的实践，未来研究应聚焦于以下方向。

(1) 面向异质货物与复杂网络的协作服务研究。将多主体战术决策从通用货运网络细化至特定品类与复杂场景，重点探究危险品运输的风险约束、快消品与冷链货物的时间敏感性以及多主体协作下的转运衔接问题。并将研究范围从单一的公铁/铁水联运扩展至包含内河驳船、远洋班轮及多个

海港/陆港协同的复杂多层次网络。

(2) 设计长期协作的动态收益分配机制。将收益分配问题进一步扩展到多节点网络与成员加入/退出情景。开发能够量化各方资源投入（如车队规模、仓储设施）贡献度的分配方法。将运力投入、服务质量、风险承担及碳排放等可核算指标纳入分配与激励参数，形成收益共享、奖惩分明的联盟。

(3) 多周期随机滚动的一体化战术规划框架。将班列开行频次与时刻表、场站能力与换装作业、车辆与箱体配置、空箱库存与调拨决策纳入统一模型，系统引入随机需求、空箱供需失衡通道容量波动等不确定性。在方法上可采用多阶段随机规划、鲁棒优化与滚动时域相结合，并通过仿真评估计划执行情况对协同收益的影响。

(4) 提高对大规模网络协同设计问题的求解能力。随着节点规模和约束条件的增加，模型求解的计算复杂度呈指数级上升。未来的研究必须在算法效率与解的质量之间寻找新的平衡，发展针对多式联运网络结构的精确算法或高效元启发式算法。同时，应强调基于真实运营数据（如实际费率、时刻表、路网拓扑）的实证验证，建立可复用的基准测试数据集。

## 5 运营层：多式联运动态竞合优化

运营层聚焦于多式联运系统在实际运行过程中的动态决策问题，具有周期短、实时性强、交互频度高的特点。核心挑战在于多主体信息无法完全共享环境下的高效调度。因此，将运营层研究划分为分布式协同调度与仿真与自适应决策两个维度。分布式协同调度解决短期路径规划和资源协同调度问题；仿真与自适应决策解决不确定性应对问题。

### 5.1 分布式协同与动态调度

运营层首先需要解决动态环境下的运量分配与资源调度问题。早期的研究多基于集中式优化思想，试图构建统一的决策中枢。例如，赵春雷等<sup>[85]</sup>提出利用物流云平台技术，在获取全网集装箱状态和运力信息的基础上，对多式联运派单进行统一优化。何维等<sup>[86]</sup>针对全程运输路径与两端接驳集卡的协同问题，构建了混合整数线性规划模型，并采用逻辑 Benders 分解算法进行求解。虽然这类方法在算法上实现了主从问题的分解，但其本质仍依赖于多式联运营人对干线与接驳资源的集中控制与完全信息掌握。此外，多式联运路径选择更是多方利益博弈下的供需匹配过程。托运人日益多样化的偏好与承运人追求规模经济的目标之间常存在冲突。针对这一问题，Peng 等<sup>[87]</sup>引入稳定匹配理论，在考虑路径容量约束的同时，将托运人对事件与费用的偏好纳入考量，构建了集装箱-路径匹配模型。

然而，在多式联运系统中，承运人、港口等各参与主体往往拥有独立的经营权，出于对客户名单、订单、成本等商业机密的保护，不愿意共享信息。因此，分布式协同逐渐成为研究重点。Huang 等<sup>[88]</sup>提出了基于模型预测控制的多式联运网络流量控制方法，通过实时信息输入，生成集装箱流量

控制决策，在高货运量场景下有效平衡了网络运输负载并降低了运营成本。Zhou 等<sup>[89]</sup>采用了基于交替方向乘法（ADMM）的分布式模型预测控制方法，提高了协同规划的收敛速度，可在保护各方隐私的前提下逼近全局最优的动态流量调度。针对同步多式联运，Larsen 等<sup>[90]</sup>设计了物流服务商与承运人之间的分层协同规划方法，在不改变各自权限的前提下实现了集装箱路径与车辆调度的联合优化。Zhang 等<sup>[91]</sup>进一步将生态标签纳入决策过程，采用自适应大邻域搜索算法（ALNS）协调承运人成本与托运人碳排放满意度，证明了协同规划能提升服务率并降低排放。此外，针对全球运营商与本地运营商之间利益不一致的问题，Guo 等<sup>[92]</sup>结合增广拉格朗日松弛法，设计了面向多运营商的分布式激励机制。该机制通过设计合理的利润分配与补偿规则，促使本地运营商在追求自身利益的同时，配合完成跨区域的全局运力资源配置。

## 5.2 运营仿真与自适应决策

多式联运系统是一个高度动态且不确定性的复杂系统，传统的数学规划模型往往难以刻画多主体的决策行为及其在突发干扰下的自适应决策<sup>[93]</sup>。因此，基于智能体的仿真和态势演变等方法成为研究的重要工具。Di 等<sup>[94]</sup>构建了多智能体仿真框架，刻画供应商、客户等多主体在信息共享条件下的分布式交互与计划调整过程，重点分析了实时信息交互对高负荷网络延误的影响。Alaei 等<sup>[95]</sup>通过 AnyLogic 仿真平台，量化对比了同步多式联运在动态重调度场景下相比传统模式在成本节约和碳减排方面的优势。为了解决有限理性与不完全信息下的决策问题，Larsen 等<sup>[96]</sup>提出了离港学习机制，使驳船运营商能够利用历史数据学习卡车运营商的成本结构，从而在无需完全信息共享的情况下做出最优离港决策。此外，Kurapati 等<sup>[97]</sup>则提出了多玩家桌面游戏方法模拟态势演变过程，将真实的决策主体（如港口调度员、基础设施管理者）置于模拟的突发中断场景中，用于训练多式联运系统在中断情景下的决策能力。以上方法一定程度上弥补了优化模型在行为刻画和不确定性处理方面的不足，但其结果多用于机制分析和政策评估，较少直接形成可操作的实时优化策略。表 6 总结了运营层相关研究的研究主体，决策架构、信息交互、适用场景等内容。

表 6 运营层动态竞合优化研究总结

Tab.6 Summary of research on dynamic co-opetition optimization at operational level

研究主题	决策架构	信息交互	竞合机制特点	适用场景	文献编号
集中式优化	集中式	全局共享/ 物流云平台	系统分配最优解	信息壁垒低、 联盟关系紧密 的内部协同	[85,86,88]
分布式协同	分布式	仅交换流量/ 成本信息	基于 ADMM、 MPC 等算法的 迭代协调、隐 私保护	多主体独立性 强、存在商业 机密保护需求	[89,90,94]
匹配与拍卖	混合式/双	报价/偏好	基于供需、时	现货市场交	[87,91,92]

	边市场	信息	间、生态偏好的供需匹配	易、托运人偏好差异大的场景	
仿真与博弈	交互式仿真	态势感知与行为观测	通过试错与学习演化合作策略	高度不确定性、突发中断应急演练	[95-98]

### 5.3 研究方向

综上所述，运营层关注动态路径规划与多主体分布式协同优化主题，主要包括全程运输路径与接驳集卡协同、基于模型预测控制的网络流量控制、集装箱-路径稳定匹配、多主体分布式交互与计划调整、动态重调度、突发中断场景下的决策等研究内容。初步形成了以分布式优化和多智能体仿真模拟为主的方法体系。

但目前运营层的研究相对较少，还存在一些不足，例如，分布式协同的研究中均未考虑隐私保护问题<sup>[89,91,92]</sup>，传统的启发式算法或精确求解器未考虑在分钟内处理大规模协同网络的动态调度<sup>[86,87,91]</sup>。因此，未来运营层研究应重点关注以下方向。

(1) 考虑隐私保护的协同调度。针对多主体因商业机密导致的数据壁垒，未来研究应探索分布式协同架构与联邦学习的融合。引入联邦学习框架，使铁路局、港口、车队等各参与主体仅需在本地训练并上传模型参数，而无需共享原始的运单与运力数据。

(2) 运筹优化与深度强化学习相结合的实时决策体系。面对运营层实时响应的需求，单一的运筹优化模型往往计算耗时过长，难以在应对突发扰动的环境下进行实时、局部的调度调整。未来研究可开发“求解器+学习器”的混合智能方法，应用深度强化学习方法来学习运筹模型求解过程中的策略或启发式算子的参数配置。进一步地，可研究基于多智能体强化学习的动态协作方法。

## 6 应用层：多式联运竞合平台构建

应用层旨在将战略、战术与运营层的理论模型转化为实际解决方案。当前应用层处于技术原型验证阶段，研究主要聚焦于利用数字化技术重构多主体间的协作关系。本文主要从架构互联、信任重构与数据治理两个维度展开综述。架构互联侧重解决“能连通”的技术基础问题；信任重构与数据治理侧重解决“愿共享”的激励驱动问题。

### 6.1 异构系统互联与平台架构建设

数字化转型首先要解决异构系统互联互通与数据主权保护问题。早期研究主要依赖中心化云计算架构<sup>[7,99]</sup>。Muñuzuri 等<sup>[100]</sup>设计基于云的 FIWARE 平台集成物联网数据，实现对海铁联运走廊中冷链状态与异常事件的实时监控。Jia 等<sup>[7]</sup>则提出用微服务架构解决港口与铁路系统接口标准不统一的难题。

然而，考虑到中心化架构面临着数据安全性与商业机密保护的问题，研究重点逐渐转向数据主

权保护。Pulido 等<sup>[101]</sup>引入了联邦数据空间的概念，提出了一种去中心化的数据生态系统。联邦空间允许参与者在保留数据所有权的前提下，通过开源连接器和策略实现数据的按需交换。这种架构能够促进同步多式联运中的信息共享。此外，Jain 等<sup>[102]</sup>的研究表明，数字货运代理等新角色的出现正在推动市场向更开放的 API 互联方向发展。

## 6.2 信任重构与数据治理

在实现系统互联的基础上，如何建立相互间的信任是应用层的核心问题。现有研究主要聚集于利用区块链技术的不可篡改与智能合约特性建立多式联运一体化平台。尹钦仪等<sup>[8]</sup>与黄敏珍等<sup>[103]</sup>构建了基于联盟链的海铁联运平台体系，通过共识机制建立了运单数据在多方面的可信流转规则，以减少中心化平台的数据垄断风险。在业务流程层面，Chu 等<sup>[104]</sup>结合 Petri 网理论的仿真对海铁联运“一单制”流程进行了建模与仿真，结果表明，引入区块链技术可消除传统纸质单据流转中的冗余环节。Qian 等<sup>[105]</sup>进一步将多方协作决策模型嵌入智能合约，构建链上代码自动执行协作规则。总体而言，当前区块链与智能合约在多式联运领域的应用仍以示范性试点和理论验证为主。

平台技术的实现也取决于参与主体的共享意愿。针对利益分配不均导致的数据难共享问题，Zheng 等<sup>[106]</sup>基于委托-代理理论构建了海运区块链平台的数据共享激励模型，量化分析了激励补贴、风险规避程度及外生风险对共享意愿的影响。杨冬<sup>[107]</sup>则采用演化博弈，证明基于智能合约的自动奖惩机制能够促使系统从无序收敛至积极共享的稳定状态。此外，对于多源数据汇聚产生的信息冲突，Qiu 等<sup>[108]</sup>提出了基于证据理论与排队论的处理模型，可提升业务流程网络在处理复杂、不一致数据时的效率。

表 7 总结了应用层文献的研究主体、关键技术理论、参与主体以及解决的竞合问题。研究表明，应用层正从单纯的技术验证向技术与管理融合的治理方向深化。

表 7 多式联运竞合平台构建研究综述

Tab. 7 Summary of research on co-opetition platform construction in intermodal transport

研究主题	作者	关键技术/理论	参与主体	解决的竞合问题
架构互联	Muñuzuri <sup>[100]</sup>	物联网、FIWARE	港口、铁路、托运人	物理层数据割裂、全程状态不可视
	Pulido <sup>[101]</sup>	联邦数据空间	驳船、港口、货主	数据主权保护与商业机密顾虑
	Jia <sup>[7]</sup>	云计算、微服务架构	港口、铁路、监管部门	信息标准不统一、系统兼容性差
信任重构	Chu <sup>[104]</sup>	Petri 网、区块链技术	承运人、经营人	业务流程冗余、纸质单据流转慢
	Qian <sup>[105]</sup>	智能合约、联	托运人、承	“一单制”协作难、

		盟链	运人	违约风险高
	尹钦文 <sup>[8]</sup>	联盟链网络架构	铁路、港口	数据中心化风险、多方信任缺失
数据治理	Zheng <sup>[106]</sup>	委托-代理模型	平台企业、参与方	利益分配不均、数据共享意愿低
	杨冬 <sup>[107]</sup>	演化博弈、多智能体技术	多式联运各主体	协同行为不稳定、动态博弈
	Qiu <sup>[108]</sup>	证据理论、排队论	铁路、公路、经营人	多源信息冲突、决策效率低

### 6.3 研究方向

应用层聚焦于平台架构搭建与数据治理等研究主题，建立了以技术原型验证为主的方法体系。但现有研究多关注区块链与智能合约的初步探索<sup>[8,104,105]</sup>，缺乏对“一单制”实施过程中责任界定不清、保险理赔与法律适用不统一等现实障碍的讨论。未来研究可在以下方向深化。

(1) 探索“一单制”的实现路径。一方面，深入分析多式联运中铁路、公路、水路、港口等不同主体的运输责任划分规则，研究基于区块链与智能合约的运输货损责任溯源、理赔证据留存，探索智能合约在理赔流程自动化中的应用潜力；另一方面，系统梳理国内多式联运法律体系的现存短板，研究跨运输方式、跨区域的法律适用冲突问题，探讨区块链存证的司法效力认定规则。

(2) 加强技术落地的实证研究。重点针对已落地实施的铁路多式联运数字化项目、多式联运信息服务平台，例如国铁集团已试行多式联运“一单制”运输，开展实证研究，量化评估技术应用对协同效率提升、主体竞合关系优化、物流成本降低的实际效果，识别落地过程中的新问题。

## 7 结束语

本文采用文献计量与系统综述相结合的方法，对 2015 年至 2025 年 6 月间国内外面向多主体参与的多式联运竞合方法研究进行了系统梳理。基于竞合问题随决策时间跨度呈现的分层特征，构建了涵盖“战略-战术-运营-应用”的四层决策分析框架。并从研究主题与方法体系角度对 116 篇核心文献进行了归纳与评述，识别了当前研究的主要进展、不足及未来发展方向。

研究表明，现有竞合方法研究已形成较为完整的分析体系。战略层以博弈论、双层规划等方法为主，聚焦竞合均衡分析、政策干预效应评估、合作伙伴评价与战略资源布局等问题；战术层以合作博弈与网络优化为主，关注服务网络协同配置与收益分配问题；运营层以分布式优化、多智能体仿真方法为主，主要解决动态环境下的实时调度与供需匹配问题；应用层则以区块链与物联网技术为支撑，探索异构系统互联、信任重构与规则落地的实现路径。需要进一步指出的是，本文构建的四层框架并非彼此孤立，而是相互关联、协同发展的整体。战略层的政策激励、治理规则与资源布局决策，会直接影响战术层的网络结构设计、运力配置方式及收益分配规则；战术层形成的资源组

织方式与合作机制，又会进一步作用于运营层的路径选择、调度响应与实时协同效率；应用层的信息平台、区块链与物联网等技术，则为战略、战术与运营决策的执行提供数据支撑、责任追溯与协同保障，并通过运行绩效评估、数据反馈与规则验证，反向促进战略层政策优化与治理机制调整。

从已有研究看，虽然大多数文献仍以单一级问题为主，但已有部分研究呈现出跨层级融合趋势。例如，Qu 等<sup>[30]</sup>、Xu 等<sup>[31]</sup>、Chen 等<sup>[32]</sup>的研究表明，补贴、投资、无水港建设等战略层政策工具，不仅影响多主体博弈均衡，还会进一步作用于内陆港整合、网络组织和运输结构调整；Song 等<sup>[25]</sup>与Álvarez-Sanjaime 等<sup>[26]</sup>的研究将港口竞争、纵向整合与下游运输服务组织纳入统一分析框架，体现出战略层竞合关系与战术层资源组织之间的衔接；Hu 等<sup>[68]</sup>、Li 等<sup>[69]</sup>、赵春雷等<sup>[85]</sup>以及 Muñuzuri 等<sup>[100]</sup>的研究，则从滚动规划、分布式协同、云平台和物联网架构等角度，体现了网络组织、动态调度与技术支持之间的融合趋势。

结合研究现状和行业实践需求，未来多式联运多主体竞合研究可从以下方面进一步深化：

(1) 拓展细分主体竞合行为与多元目标下的战略层竞合研究。进一步将中小货主、区域物流平台、无车承运人、内陆支线承运人等细分主体纳入竞合分析框架，刻画不同主体的行为、资源约束与风险偏好，并考虑低碳、韧性、公平与效率等多个目标。

(2) 构建面向异质货物的协同网络与多周期动态收益分配机制。面向危化品、冷链货物等差异化运输需求，研究复杂网络条件下的服务组织、运力配置、空箱调拨及动态收益分配问题。

(3) 发展面向不确定环境与隐私保护的运营层智能决策方法。结合需求波动、运输时间不确定及供应链中断等情景，进一步融合多智能体强化学习与分布式优化等方法，提高多主体协同调度的实时响应能力与系统韧性。

(4) 推进应用层技术与治理规则的协同落地，围绕“一单制”“一箱制”等实践需求，研究平台互联、责任界定、理赔链条、证据存证及法律适用等关键问题，并量化评估数字化平台对协同效率提升、竞合关系优化和治理能力增强的实际效果。

(5) 加强多决策层级的融合研究。未来应从跨层级视角揭示政策工具影响资源配置规则的作用机制，明确资源配置方案嵌入运营层动态调度的实现路径，并关注应用层技术落地后形成的数据如何反向支持战略层政策评估与规则迭代，逐步构建“政策制定-资源组织-运营执行-技术反馈”的研究体系。

总体而言，多式联运多主体竞合研究正由单一层次逐步向多层级、多目标与多方法融合发展。未来研究应在保持分层分析优势的基础上，进一步加强各个层次之间的衔接与融合，推动理论模型研究与多式联运信息平台建设、规则制定及协同治理实践相结合，从而为我国多式联运高质量发展、“一单制”推广及综合运输体系的现代化提供更有力的理论支撑与方法参考。

## 参考文献

- [1] 新华网. 打通物流供应链上的堵点——来自 2025 中国多式联运合作大会上的观察[EB](2025-04-25).
- [2] CHRISTOPHER M, HOLWEG M. Supply chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2017, 47(1): 2-17.
- [3] GENOVESE A, ACQUAYE A A, FIGUEROA A, et al. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications[J]. *Omega*, 2017, 66: 344-357.
- [4] 侯海录. 铁路集装箱多式联运发展策略研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2018, 16(1): 56-60.  
HOU Hailu. Research on the development strategy of multimodal transport by railway container[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2018, 16(1): 56-60.
- [5] 卜凡, 吕莹, 奇格奇, 等. 时间和碳交易价格不确定的协同联运路径优化[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025(9): 1-18.  
Bu Fan, LV Yin, QI Geqi, et al. Optimization of synchromodal transport routes under uncertain time and carbon trading prices[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025(9): 1-18.
- [6] LUO M, CHEN F, ZHANG J. Relationships among port competition, cooperation and competitiveness: a literature review[J]. *Transport Policy*, 2022, 118: 1-9.
- [7] JIA F, SUN L, YUAN J, et al. The business process reconstruction of railway-river combined transportation cloud platform taking China container export as an example[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021(1): 9946458.
- [8] 尹钦仪, 盛国伟, 张戎. 我国海铁联运信息平台构建模式[J]. *铁道运输与经济*, 2024, 46(6): 65-72.  
YIN Qinyi, SHENG Guowei, ZHANG Rong. Construction pattern of China's rail-sea multimodal transport information platform[J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(6): 65-72.
- [9] 陈静. 基于区块链的多式联运“一单制”多主体协同研究[D]. 大连海事大学, 2023.  
Chen Jin. Research on "One-Bill Coverage System" Multi-Agent Collaboration of Multimodal Transport based on Blockchain[D]. Dalian Maritime University, 2023.
- [10] 庄汝龙, 张晶晶, 职梦露, 等. 基于 2000—2023 年 CNKI 和 WOS 期刊文献的海铁联运研究综述[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(3): 66-83.  
ZHUANG Rulong, ZHANG Jingjing, ZHI Menglu, et al. Review of research on sea-rail intermodal transport: a comprehensive analysis based on CNKI and WOS journal literature from 2000 to 2023[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(3): 66-83.
- [11] SAKTI S, ZHANG L, THOMPSON R G. Synchronization in synchromodality[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 179: 103321.
- [12] ZHANG Y, TAN X, GAN M, et al. Operational synchromodal transport planning methodologies: Review and roadmap[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 194: 103915.
- [13] 常祎妹, 王子翔, 林忆婷. 集装箱铁水联运作业设备调度优化研究综述[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2025. 1-27[2026-03-21]. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2025.03.033>.  
CHANG Yimei, WANG Zixiang, Lin Yitin. Review on operation equipment scheduling of container for rail-water intermodal[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025.1-27[2026-03-21]. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2025.03.033>.

- [14] 杨忠振, 张尔卓, 杜怡颖, 等. 基于文献计量的多式联运物流工程研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(2): 1-23.  
YANG Zhongzhen, ZHANG Erzhuo, DU Yiyang, et al. Review of multimodal transport logistics engineering based on bibliometrics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(2): 1-23.
- [15] 马玉涵, 杨培杰, 薛杰, 等. 中国集装箱多式联运研究热点及发展趋势[J]. 交通信息与安全, 2025, 43(1): 15-30.  
MA Yuhan, YANG Peijie, XUE Jie, et al. Research hotspots and development trends of container multimodal transport in China[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2025, 43(1): 15-30.
- [16] 陈宁, 张程, 陈翔宇, 等. 基于伯川德博弈的港口集装箱海铁联运竞争策略[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(8): 40-47.  
CHEN Ning, ZHANG Cheng, CHEN Xiangyu, et al. Competitive and cooperation strategy of container rail-sea intermodal transportation based on bertrand game[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(8): 40-47.
- [17] SONG L, YANG D, CHIN A T H, et al. A game-theoretical approach for modeling competitions in a maritime supply chain[J]. Maritime Policy & Management, 2016, 43(8): 976-991.
- [18] LIU J, LI Y, LI J. Coopetition in intermodal freight transport services[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015, 2015(1): 680685.
- [19] 徐新扬, 杨扬. 政府主导下公铁联运系统三方演化博弈研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 7-15.  
XU Xinyang, YANG Yang. Tripartite evolutionary game of rail-road intermodal transport system under domination of government[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 7-15.
- [20] TAMANNAEI M, ZAREI H, RASTI-BARZOKI M. A game theoretic approach to sustainable freight transportation: Competition between road and intermodal road-rail systems with government intervention[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2021, 153: 272-295.
- [21] LEE H, CHOO S. Optimal decision making process of transportation service providers in maritime freight networks[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(2): 922-932.
- [22] 冯芬玲, 李杰潞. 基于 Hoteling 模型的公路和铁路货运价格与服务竞争[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 388-394.  
FENG Fenling, LI Jielu. Price and service competition between rail and road freight transportation based on Hoteling model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2): 388-394.
- [23] 李路辉, 汤银英. 基于公铁博弈的铁路集装箱竞争定价研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(4): 136-141.  
LI Luhui, TANG Yinying. Research on competitive pricing of railway container based on the game of railway transport and highway transport[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(4): 136-141.
- [24] 片峰, 陈阳, 庞世花, 等. 考虑铁路折扣的集装箱公路与多式联运博弈定价[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 1-10.  
PIAN Feng, CHEN Yang, PANG Shihua, et al. Game pricing of container road and multimodal transport considering railway discount[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4): 1-10.
- [25] SONG Z, TANG W, ZHAO R. A simple game theoretical analysis for incentivizing multi-modal transportation in freight supply chains[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 283(1):

- 152-165.
- [26] ÁLVAREZ-SANJAIME Ó, CANTOS-SÁNCHEZ P, MONER-COLONQUES R, et al. The impact on port competition of the integration of port and inland transport services[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 80: 291-302.
- [27] MUNIM Z H, HARALAMBIDES H. Competition and cooperation for intermodal container transshipment: a network optimization approach[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2018, 26: 87-99.
- [28] 张桐, 毛保华, 曾玮, 等. 集装箱公铁联运定价策略的博弈分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(6): 209-214, 256.
- ZHANG Tong, MAO Baohua, ZENG Wei, et al. Pricing strategy of container rail-road intermodal transport based on game theory[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(6): 209-214, 256.
- [29] 吴云强, 解乔雅, 张戎. 集装箱海铁联运补贴优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(1): 35-45. WU Yunqiang, XIE Qiaoya, ZHANG Rong. Optimization of subsidies for container sea-rail intermodal transportation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(1): 35-45.
- [30] QU C, ZENG Q, LI K X, et al. Modeling incentive strategies for landside integration in multimodal transport chains[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 137: 47-64.
- [31] XU H, LIU J, QI S. Incentive policy for rail-water multimodal transport: Subsidizing price or constructing dry port?[J]. *Transport Policy*, 2024, 150: 219-243.
- [32] CHEN Z, ZHANG Z, BIAN Z, et al. Subsidy policy optimization of multimodal transport on emission reduction considering carrier pricing game and shipping resilience: a case study of Shanghai port[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 243: 106760.
- [33] XU X, ZHANG Q, WANG W, et al. Modelling port competition for intermodal network design with environmental concerns[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 720-735.
- [34] LONG Q, WU Q. Game-theoretic modeling of sustainable intermodal freight transportation: Optimal pricing and energy efficiency strategies under government intervention and fuzzy uncertainty[J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2025, 16(3): 721-736.
- [35] SHAMS H R, TAMANNAEI M, ZAREI H. A game-theoretic approach to designing carbon regulations in a duopoly freight transportation market: Road and multimodal road-rail competitive systems[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(51): 111284-111308.
- [36] ZHANG Y, ZHANG A, WANG K, et al. Impact of CR Express and intermodal freight transport competition on China-Europe Route: Emission and welfare implications[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, 171: 103642.
- [37] GONG X, LI Z C. Determination of subsidy and emission control coverage under competition and cooperation of China-Europe Railway Express and liner shipping[J]. *Transport Policy*, 2022, 125: 323-335.
- [38] SHI J, CHEN J, XU L, et al. Improving the resilience of maritime supply chains: The integration of ports and inland transporters in duopoly markets[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2023, 10(1): 51-66.
- [39] WU X, WANG K, FU X, et al. How would co-opetition with dry ports affect seaports' adaptation to disasters?[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 130: 104194.
- [40] YANG L, LIN X, LI E Y, et al. Lock congestion relief in a multimodal network with public subsidies

- and competitive carriers: a two-stage game model[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 43707-43719.
- [41] 唐继孟, 李建, 阳波. 补贴政策对集装箱公铁联运竞争力的影响分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(6): 201-208.  
TANG Jimeng, LI Jian, YANG Bo. Impact of subsidy policy on the competitiveness of container rail-road intermodal transport[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(6): 201-208.
- [42] 刘澜, 黄豪. 基于最优决策的国际铁路多式联运合作伙伴选择模型[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(5): 110-117.  
LIU Lan, HUANG Hao. Partner selection model for international railway intermodal transportation based on optimal decision[J]. *China Railway Science*, 2019, 40(5): 110-117.
- [43] 李华强, 刘浩学, 韩言虎. 多式联运联盟合作伙伴选择[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(8): 152-158.  
LI Huaqiang, LIU Haoxue, HAN Yanhu. Selection of partner in multimodal transport alliance[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(8): 152-158.
- [44] JIANG X, FAN H, LUO M, et al. Strategic port competition in multimodal network development considering shippers' choice[J]. *Transport Policy*, 2020, 90: 68-89.
- [45] CHEN K, XIN X, ZHANG T, et al. Multiport cooperative location model with a safe-corridors setting in West Africa[J]. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2020, 23(6): 580-601.
- [46] LI L, WANG J, WANG H, et al. Intermodal transportation hub location optimization with governments subsidies under the Belt and Road Initiative[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 231: 106414.
- [47] TSAO Y C, LINH V T. Seaport- dry port network design considering multimodal transport and carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 199: 481-492.
- [48] WU Y, ZHANG R. Game-theoretical method toward dry port multilevel location considering capacity constraints and shippers' choice behavior[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023, 2677(11): 64-82.
- [49] ZHANG Q, WANG W, PENG Y, et al. A game-theoretical model of port competition on intermodal network and pricing strategy[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 114: 19-39.
- [50] 张慧, 周信哲, 陈月艳. 港口多式联运“公转铁”的三方演化博弈研究[J]. *杭州电子科技大学学报(社会科学版)*, 2023, 19(6): 26-37.  
ZHANG Hui, ZHOU Xinzhe, CHEN Yueyan. Research on the tripartite evolutionary game of “road to rail” of port multimodal transport[J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University (Social Sciences)*, 2023, 19(6): 26-37.
- [51] 段华薇, 戴玥, 严余松. 铁路物流中心参与的公铁联运物流服务供应链协调[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(6): 1590-1598.  
DUAN Huawei, DAI Yue, YAN Yusong. Contracts for road and railway intermodal transportation logistics service supply chain in railway logistics park[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(6): 1590-1598.
- [52] 张得志, 唐嘉欣, 王臻杰. 公铁联运背景下内河港与无水港竞合博弈研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(1): 42-51.  
ZHANG Dezhi, TANG Jiabin, WANG Zhenjie. Research on the competition and cooperation game of inland river port and dry port under the background of rail-road intermodal transport[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(1): 42-51.

- [53] 李丹丹, 侯敬. 铁水联运经营模式选择演化博弈研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(5): 91-98.  
LI Dandan, HOU Jing. Evolutionary game for business mode selection in rail-water intermodal transport[J]. *Railway Transport and Economy*, 2022, 44(5): 91-98.
- [54] LIU J, XU H, CHEN J. The effects and conflicts of co-opetition in a rail-water multimodal transport system[J]. *Annals of Operations Research*, 2026, 359(2): 1193-1238.
- [55] MONIOS J. Identifying governance relationships between intermodal terminals and logistics platforms[J]. *Transport Reviews*, 2015, 35(6): 767-791.
- [56] ZHANG Y, LI H, ZHANG W, et al. Construction of common key technology system of multimodal transport connection[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 212.
- [57] RAMAEKERS K, VERDONCK L, CARIS A, et al. Allocating collaborative costs in multimodal barge networks for freight bundling[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 65: 56-69.
- [58] 贺政纲, 黄娟, 帅宇红. 基于蚁群劳动分工的多式联运利益分配研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(11): 19-26.  
HE Zhenggang, HUANG Juan, SHUAI Yuhong. Research on benefit allocation of multimodal transport based on ant colony's labor division[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(11): 19-26.
- [59] 朱文英, 赵雨, 张红英, 等. 时间窗约束下多式联运企业收益分配优化模型研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 247-254.  
ZHU Wenying, ZHAO Yu, ZHANG Hongying, et al. Study on income distribution optimization model of multimodal transport enterprise under time window constraint[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(12): 247-254.
- [60] KHASLAVSKAYA A, MONIOS J, ROSO V. Using coopetition to increase asset utilization and market coverage of dry ports[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2024, 57: 101219.
- [61] Kliuyeva K. ESC regrets withdrawal of Combined Transport Directive Amendment[EB](2025-10-30).
- [62] QU C, WANG G W Y, ZENG Q. Modelling port subsidy policies considering pricing decisions of feeder carriers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 99: 115-133.
- [63] TAMANNAEI M, ZAREI H, AMINZADEGAN S. A game-theoretic approach to the freight transportation pricing problem in the presence of intermodal service providers in a competitive market[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2021, 21(1): 123-173.
- [64] 王文渊, 王盛华, 彭云, 等. 整合公路运输服务下竞争性港口定价博弈模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 229-235.  
WANG Wenyuan, WANG Shenghua, PENG Yun, et al. Pricing game model of competitive port integrating highway transportation service[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(6): 229-235.
- [65] ASADABADI A, MILLER-HOOKS E. Maritime port network resiliency and reliability through co-opetition[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 137: 101916.
- [66] LIU D, DENG Z, SUN Q, et al. Design and freight corridor-fleet size choice in collaborative intermodal transportation network considering economies of scale[J]. *Sustainability*, 2019, 11(4): 990.
- [67] LIU D, YAN P, DENG Z, et al. Collaborative intermodal freight transport network design and vehicle arrangement with applications in the oil and gas drilling equipment industry[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2020, 16(3): 1574-1603.

- [68] HU Q, WIEGMANS B, CORMAN F, et al. Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2019, 31(3): 807-831.
- [69] LI L, NEGENBORN R R, DE SCHUTTER B. Distributed model predictive control for cooperative synchromodal freight transport[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 105: 240-260.
- [70] BUKVIĆ L, PAŠAGIĆ ŠKRINJAR J, ABRAMOVIĆ B, et al. Route selection decision-making in an intermodal transport network using game theory[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4443.
- [71] TANG Y, ZHANG F. Analysis of international trade transportation strategy of logistics under game theory model[J]. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 2024, 9: 20241871.
- [72] SUN J, LI G, XU S X, et al. Intermodal transportation service procurement with transaction costs under Belt and Road initiative[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 127: 31-48.
- [73] XIE Y, LIANG X, MA L, et al. Empty container management and coordination in intermodal transport[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(1): 223-232.
- [74] LUO T, CHANG D. Empty container repositioning strategy in intermodal transport with demand switching[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 40: 1-13.
- [75] LIOTTA G, KAIHARA T, STECCA G. Optimization and simulation of collaborative networks for sustainable production and transportation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(1): 417-424.
- [76] Guo Z, Jiang Y. Efficient rail-water intermodal transportation network using game theory[J]. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 2023, 316: 725-735.
- [77] 李倩, 刘擎, 吴群琪, 等. 国际多式联运收益分配博弈模型及 Raiffa 解优化[J]. *铁道运输与经济*, 2022, 44(4): 59-65.  
LI Qian, LIU Qing, WU Qunqi, et al. Revenue distribution game model for international multimodal transport and raiffa solution optimization[J]. *Railway Transport and Economy*, 2022, 44(4): 59-65.
- [78] 张德超. 集装箱多式联运收益分配博弈分析研究[D]. 兰州交通大学, 2016.  
ZHANG Dechao. Game analysis research on profit allocation of container multimodal transport[D]. Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [79] 张文瀛. 内河集装箱多式联运系统优化及协同策略研究[D]. 北京交通大学, 2020.  
ZHANG Wenying. Research on Optimization and Collaboration Strategies of Inland River Container Intermodal Transport System[D]. Beijing Jiaotong University, 2020.
- [80] 陈芊, 谢美全, 魏伟. 集装箱多式联运利益分配优化: 基于纳什均衡视角[J]. *物流技术*, 2024, 43(11): 151-160.  
CHEN Qian, XIE Meiquan, WEI Wei. Optimization of benefit distribution in container multimodal transport: a Nash equilibrium perspective[J]. *Logistics Technology*, 2024, 43(11): 151-160.
- [81] BOUCHERY Y, SLIKKER M, FRANSOO J C. Intermodal hinterland network design games[J]. *Transportation Science*, 2020, 54(5): 1272-1287.
- [82] 尹传忠, 邱慧妍, 柯媛定, 等. 区域主枢纽港多式联运网络协同优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(1): 63-70.  
YIN Chuazhong, QIU Huiyan, KE Yuanding, et al. Collaborative optimization for multimodal transport network of regional main hub ports[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(1): 63-70.
- [83] QIU X, LEE C Y. Quantity discount pricing for rail transport in a dry port system[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122: 563-580.

- [84] STERZIK S, KOPFER H, YUN W Y. Reducing hinterland transportation costs through container sharing[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27(2): 382-402.
- [85] 赵春雷, 孟亚斌, 柳建波, 等. 基于物流云平台的多式联运派单模型及求解策略[J]. *铁道学报*, 2018, 40(1): 1-8.  
ZHAO Chunlei, MENG Yabin, LIU Jianbo, et al. Dispatch model and solution strategy for multimodal transportation based on logistics cloud platform[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(1): 1-8.
- [86] 何维, 何世伟, 迟居尚, 等. 集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(7): 2175-2184.  
HE Wei, HE Shiwei, CHI Jushang, et al. Collaborative optimization of door-to-door transport routes and drayage truck scheduling in container intermodal transport[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(7): 2175-2184.
- [87] PENG Z, JIA P, JIN L, et al. Stable container-route matching in multimodal transport: a case of Yangtze River Economic Belt[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 192: 110218.
- [88] HUANG Y, ZHOU Q, XIONG X, et al. A cooperative intermodal transportation network flow control method based on model predictive control[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021(1): 6658319.
- [89] ZHOU Q, HUANG Y, XIONG X, et al. Distributed model predictive control methods for intermodal transport cooperative planning based on ADMM[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023, 17(1): 102-118.
- [90] LARSEN R B, GUO W, ATASOY B. A real-time synchromodal framework with co-planning for routing of containers and vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 157: 104412.
- [91] ZHANG Y, HEINOLD A, MEISEL F, et al. Collaborative planning for intermodal transport with eco-label preferences[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 112: 103470.
- [92] GUO W, ZHANG Y, LI W, et al. Augmented Lagrangian relaxation-based coordinated approach for global synchromodal transport planning with multiple operators[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 185: 103535.
- [93] ZHANG Y, NEGENBORN R R, ATASOY B. Synchromodal freight transport re-planning under service time uncertainty: an online model-assisted reinforcement learning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 156: 104355.
- [94] DI FEBBRARO A, SACCO N, SAEEDNIA M. An agent-based framework for cooperative planning of intermodal freight transport chains[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 64: 72-85.
- [95] ALAEI S, DURÁN-MICCO J, MACHARIS C. Synchromodal transport re-planning: an agent-based simulation approach[J]. *European Transport Research Review*, 2024, 16(1): 1.
- [96] LARSEN R B, NEGENBORN R R, ATASOY B. A learning-based co-planning method with truck and container routing for improved barge departure times[J]. *Annals of Operations Research*, 2025, 350(1): 169-199.
- [97] KURAPATI S, LUKOSCH H, VERBRAECK A, et al. Improving resilience in intermodal transport operations in seaports: a gaming approach[J]. *EURO Journal on Decision Processes*, 2015, 3(3/4): 375-396.
- [98] KURAPATI S, KOUROUNIOTI I, LUKOSCH H, et al. Fostering sustainable transportation operations

- through corridor management: a simulation gaming approach[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 455.
- [99] 廖正文, 李海鹰, 王莹, 等. 铁路多式联运一体化技术平台方案设计[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(2): 82-87.
- LIAO Zhengwen, LI Haiying, WANG Ying, et al. Design of the integrated technology platform of railway intermodal transportation[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(2): 82-87.
- [100] MUÑUZURI J, ONIEVA L, CORTÉS P, et al. Using IoT data and applications to improve port-based intermodal supply chains[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 105668.
- [101] PULIDO J M, CARDENAS I, CARLAN V, et al. Contributing to synchromodality through the implementation of a federated data space in Inland Waterway Transport[J]. Transportation Engineering, 2025, 21: 100351.
- [102] JAIN A, VAN DER HEIJDEN R, MARCHAU V, et al. Towards rail-road online exchange platforms in EU-freight transportation markets: an analysis of matching supply and demand in multimodal services[J]. Sustainability, 2020, 12(24): 10321.
- [103] 黄敏珍, 王瑞民, 林晓蕾. 多式联运数据交换区块链技术应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(2): 75-81.
- HUANG Minzhen, WANG Ruimin, LIN Xiaolei. A study of the application of block chain technology on multimodal transportation data exchange[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(2): 75-81.
- [104] CHU L, DING J, XIE Y. Modeling and analysis of Petri nets for multimodal transport "single contract" systems based on blockchain[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2024, 10: 04023047.
- [105] QIAN X, SHEN L, YANG D, et al. Research on multimodal transport of electronic documents based on blockchain[J]. Big Data and Cognitive Computing, 2024, 8(6): 67.
- [106] ZHENG H, LI K X, NG A K Y, et al. Enhancing data sharing in maritime blockchain platforms: an incentive mechanism based on principal-agent model[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 199: 104153.
- [107] 杨冬. 基于区块链的集装箱多式联运“一单制”研究[D]. 大连海事大学, 2024.
- YANG Dong. Research on "One-bill coverage system" of Container Multimodal Transport Based on Blockchain[D], 2024.
- [108] QIU X, LI J, NORIEGA J J S, et al. A business process network efficiency model for handling conflicting information[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 294: 111776.